

บทที่ 2

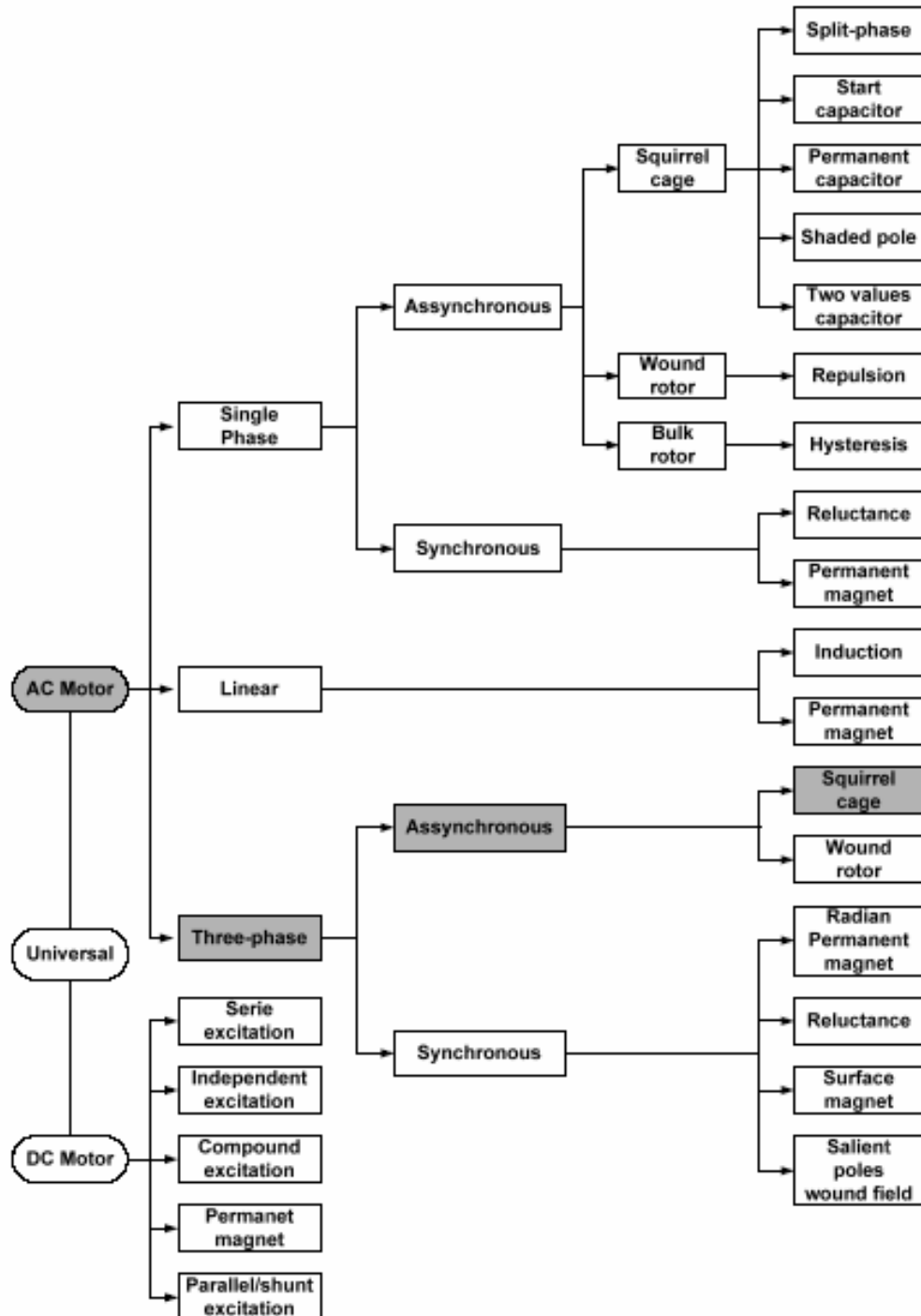
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงปรากฏการณ์ทางกายภาพ ชนิด การทำงาน การประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3-เฟส ตลอดจนการเกิดความผิดปกติจากสาเหตุต่าง ๆ หลังการใช้งาน ได้แก่ การลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างรอบถึงรอบ คอยล์ถึงคอยล์ ขดลวดรั่วลงกราวด์ การหายไปของขดลวดบางเฟส และกรณีความไม่สมมาตรของแกนโรเตอร์

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส (3-phase induction motor) เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่นิยมใช้งานได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรม สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage type) ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทาน การติดตั้งกระทำได้ง่าย ความถี่ในการดูแลรักษาต่ำ ราคาหรือต้นทุนที่ต่ำกว่า รวมทั้งความสามารถในการทำงานในสภาพแวดล้อมที่สกปรก มีประกายไฟ การควบคุมการทำงานได้มีการพัฒนาเทียบได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดี ซี สามารถนำไปใช้กับ บีม พัดลม เครื่องมือกล คอมเพรสเซอร์ เครื่องผสมอาหาร ระบบสายพานลำเลียง และงานขับเคลื่อนอื่น ๆ อีกมากมาย นอกจากนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถทำงานได้จากการได้รับสัญญาณไซนส์ที่มีความถี่คงที่จากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณไซนส์ที่เปลี่ยนแปลงความถี่ได้ ในอดีตที่ผ่านมามอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้ในการขับเคลื่อนโหลดที่มีอัตราเร็วคงที่เท่านั้น ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากการควบคุมอัตราเร็วให้เปลี่ยนแปลงอย่างละเอียดนั้นทำได้ค่อนข้างยาก นอกจากนี้ยังไม่สามารถรักษาแรงบิด (torque) ของมอเตอร์ให้คงที่ได้ เมื่ออัตราความเร็วรอบเปลี่ยนไป แต่ด้วยวิทยาการทางเทคโนโลยีสมัยใหม่ทั้งด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้ถูกนำมาใช้ เพื่อแก้ปัญหาในระบบควบคุมอัตราเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพการทำงาน และความเชื่อมั่นของระบบที่ทัดเทียมกับระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผลให้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับความนิยมนัดเทียมกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถจำแนกออกได้หลายชนิดดังภาพประกอบ 2-1



ภาพประกอบ 2-1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้า

[ที่มา : WEG, General Catalog of Electric Motors.Brazil:]

เนื่องจากว่ามอเตอร์ไฟฟ้ามีหลายประเภทและหลายชนิด ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage induction motor) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ชนิดอซิงโครนัส (asynchronous motor) ดังนั้นมอเตอร์ที่อ้างถึงในงานวิจัยนี้จึงหมายถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกเท่านั้น ดังภาพประกอบ 2-1 ที่ได้เน้นเป็นสีเทาไว้

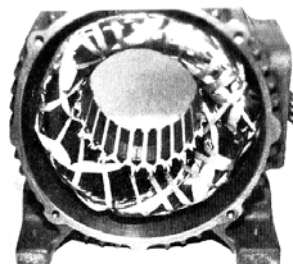
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แม้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ หลายส่วน แต่ส่วนประกอบพื้นฐานของมอเตอร์ ก็คือสเตเตอร์และโรเตอร์ โครงสร้างของสเตเตอร์ประกอบด้วยแผ่นอัดชนิดเหล็กกล้ามาประกบซ้อนกันเป็นตัวยูทรงกระบอก เพื่อเป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก ดังภาพประกอบ 2-2(a) โดยมีขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟสจัดวางอยู่ในร่องบนผิวหน้าด้านในของตัวยู ดังภาพประกอบ 2-2(b) ส่วนโครงสร้างของโรเตอร์ประกอบด้วยแผ่นโลหะชนิดเฟอร์โรแมกเนติกประกบอัดกันเป็นรูปทรงกระบอกและทำร่องไว้บนผิวด้านนอกสำหรับฝังตัวนำ หรือวางขดลวดระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์จะเป็นช่องอากาศแคบ ๆ (air gap) แบบสมมาตรรอบๆ ทรงกระบอก ขดลวดบนโรเตอร์มีสองแบบด้วยกันคือแบบขดลวดพัน (wound rotor) ดังภาพประกอบ 2-3 และแบบกรงกระรอก (squirrel cage) ดังภาพประกอบ 2-4 โรเตอร์แบบกรงกระรอกจะประกอบด้วยแท่งทองแดงหรือแท่งอะลูมิเนียมฝังอยู่ในร่องโรเตอร์แล้วปิดหัวท้ายด้วยแหวนทองแดงหรืออะลูมิเนียมเพื่อลัดวงจรขดลวด ส่วนโรเตอร์แบบพันขดลวดจะมีรูปแบบเหมือนกับขดลวดของสเตเตอร์ ปลายขดลวดโรเตอร์จะต่ออยู่กับวงแหวนลื่น (slip ring) สามอัน และจะใช้แปรงถ่านซึ่งยึดอยู่กับที่กดสัมผัสอยู่บนวงแหวนลื่น ทำให้ปลายขดลวดของโรเตอร์ต่อกับวงจรภายนอกที่เป็นตัวต้านทานแบบ 3 เฟส เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโรเตอร์ทั้งสองแบบแล้ว จะเห็นว่าโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า ประหยัดกว่า และทนทานกว่าโครงสร้างของ โรเตอร์แบบขดลวดพัน

ชุดขดลวด 3 เฟส บนสเตเตอร์และบนโรเตอร์ที่เป็นแบบขดลวดพันจะจัดวางให้กระจายไปรอบๆ ทรงกระบอก ทำให้สามารถใช้แกนเหล็กและขดลวดทองแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กได้ดีขึ้น ทำให้มอเตอร์สร้างแรงบิดแม่เหล็กได้อย่างสม่ำเสมอ ขดลวดในแต่ละเฟสจะกระจายอยู่บนร่องหลายๆ ร่อง เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดที่กระจายอยู่นี้ จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในช่องอากาศเป็นแบบไซนูซอยดัล



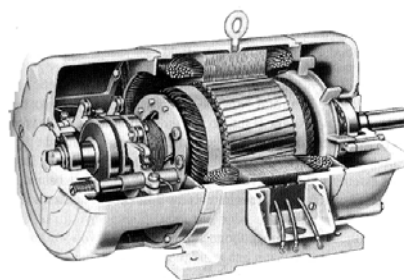
(a) ทางเดินของสนามแม่เหล็ก



(b) ชุดขดลวดสเตเตอร์

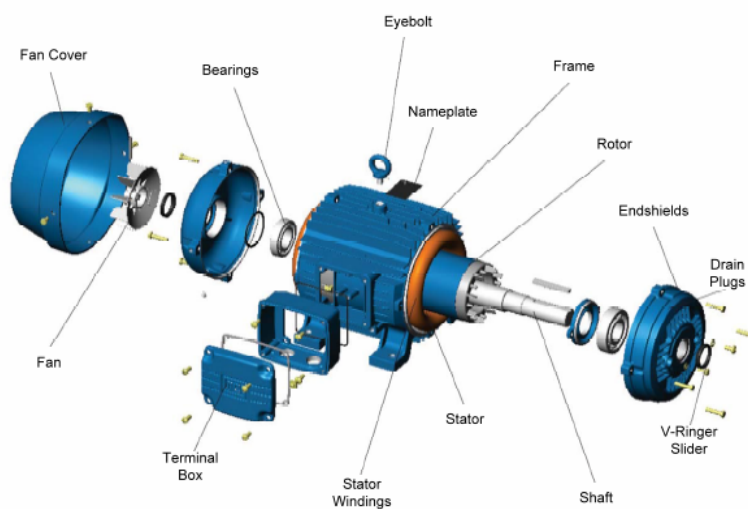
ภาพประกอบ 2-2 การพันขดลวดสเตเตอร์และทางเดินของสนามแม่เหล็ก

[ที่มา : ABB:]



ภาพประกอบ 2-3 ขดลวดสเตเตอร์และ โรเตอร์แบบขดลวดพัน

[ที่มา : ABB:]

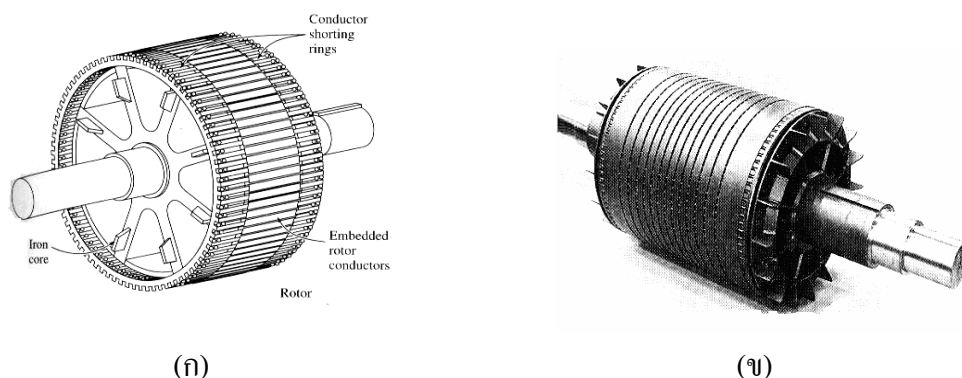


ภาพประกอบ 2-4 โครงสร้างโดยรวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก

[ที่มา : Courtesy of Electricmotors WEG SA, Brazil:]

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกัน คือ โครง (frame) แกนเหล็ก (lamination core) และขดลวด (windings) โครง เป็นส่วนที่ยึดสเตเตอร์และโรเตอร์โดยมีแกนโรเตอร์ (shaft) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักจากโรเตอร์ทั้งหมดแล้วส่งผ่านไปยังรองลื่น(bearings)อีกทอดหนึ่ง ส่วนของขดลวดสเตเตอร์มี 3 ชุดพันกระจายอยู่ในร่องสลีตของส่วนที่เป็นแกนสเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส พลังงานที่ได้จากโรเตอร์เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “มอเตอร์เหนี่ยวนำ” ช่องว่างระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์เรียกว่า air-gap

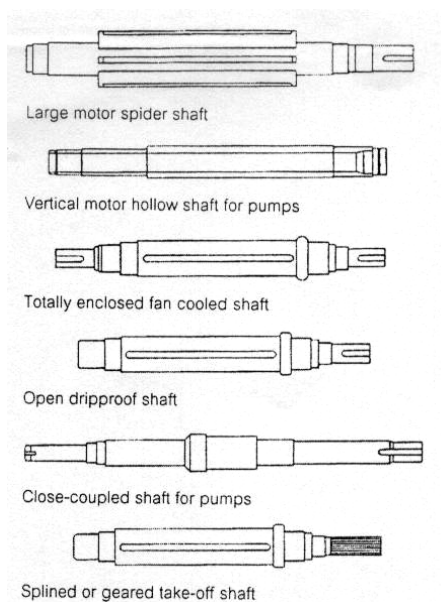
โรเตอร์กรงกระรอกประกอบด้วยเหล็กแผ่นซ้อนอัด (laminated steel) เพื่อนำพาฟลักซ์แม่เหล็ก การส่งผ่านความร้อน และโครงสร้างของกรง ส่วนแท่งตัวนำโรเตอร์ (rotor bars) มีหน้าที่นำพากระแสไฟฟ้าและสร้างแรงบิด รองลื่น(bearing)จะติดอยู่กับเพลา(shaft) เพื่อกำหนดตำแหน่งของโรเตอร์ ใบพัด(fans) โดยปกติจะถูกติดตั้งไว้ที่โรเตอร์เพื่อระบายความร้อนให้แก่มอเตอร์ โรเตอร์อาจจะประกอบด้วยรูระบายอากาศ (air duct) โดยเฉพาะโรเตอร์แบบสไปเดอร์ (spider) ตัวอย่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังภาพประกอบ 2-5(ก) และ 2-5(ข)



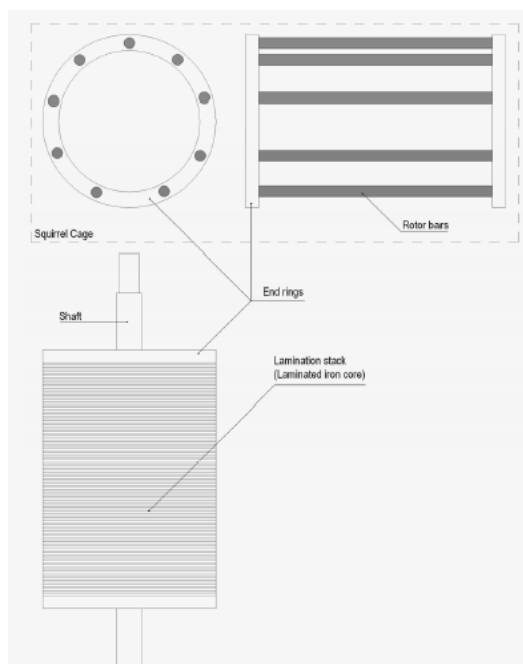
ภาพประกอบ 2-5 (ก) โครงร่างโรเตอร์กรงกระรอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
(ข) ตัวอย่างของโรเตอร์กรงกระรอก

เพลาโรเตอร์โดยปกติแล้วจะทำมาจากเหล็กเบอร์ 1045 ซึ่งเป็นเกรดที่มีความแข็งแรงสูง หรือเหล็กที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันรวมถึงวัสดุอื่น ๆ สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ ที่พิเศษ เช่น CR-MO 1442 สแตนเลส 416 และคาร์บอน 1144 ขนาดของเพลาก็จะออกแบบโดยพิจารณาจากแรงบิดทั้งในสภาวะปกติและสภาวะชั่วคราว (transient) รูปร่างของเพลามีหลายแบบ ดังภาพประกอบ 2-6

การยึดโรเตอร์กับแผ่นเหล็กทรงกระบอกที่มีแท่งตัวนำฝังอยู่จะต้องไม่เอียง และจะต้องไม่สัมผัสกับสเตเตอร์ขณะที่เริ่มเดินและขณะเดิน (startup or running) ดังภาพประกอบ 2-7



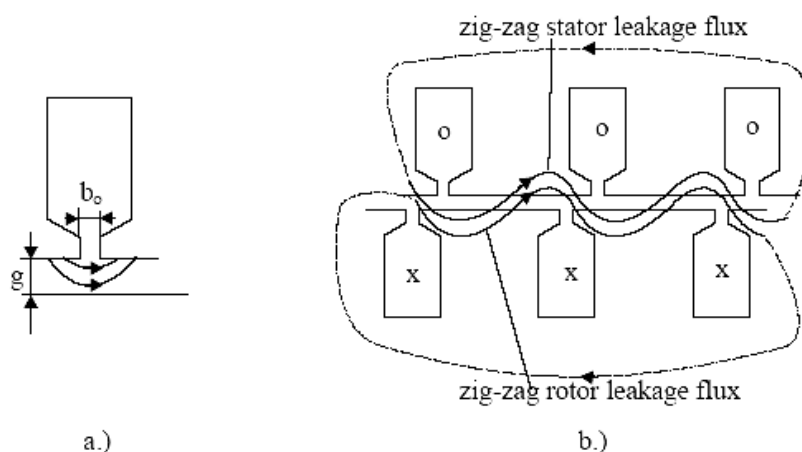
ภาพประกอบ 2-6 เฟลาของมอเตอร์แบบต่างๆ



ภาพประกอบ 2-7 โรเตอร์ทรงกระบอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ช่องอากาศ (air-gap) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น หมายถึงช่องว่างที่อยู่ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางอันในของสเตเตอร์กับเส้นผ่านศูนย์กลางอันนอกของโรเตอร์ ความยาวของช่องอากาศจะถูกคงที่ไว้ที่ค่าต่ำสุด เพื่อป้องกันการถึงกันทางกลระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ซึ่งขนาดของช่องอากาศจะมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะในการทำงานบางอย่างของโรเตอร์

สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะส่งกำลังไฟฟ้าข้ามผ่านช่องอากาศ และเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังกล ช่องอากาศที่ยาวกว่าจำเป็นต้องใช้แรงแม่เหล็ก (magnetic force) มากกว่า เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ถ้ากระแสแม่เหล็ก (magnetic current) มากขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังก็จะต่ำลง ดังนั้นสำหรับค่าตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุด ช่องอากาศควรจะมีความกว้างที่เล็กที่สุด อย่างไรก็ตามในเรื่องของประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด ช่องอากาศควรจะมีความกว้าง (กว้าง) เนื่องจากสามารถลดฟลักซ์ซิกแซก (zigzag flux) ลงได้ รวมทั้งความสูญเสียปลิกย่อย (stray loss) ก็จะถูกทำให้ลดลงด้วย

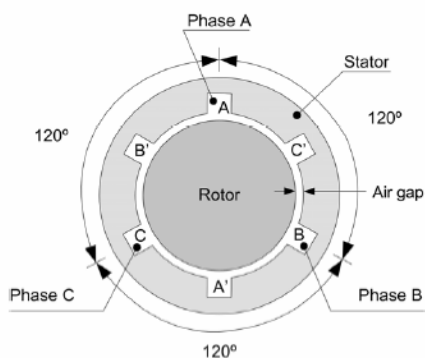


ภาพประกอบ 2-8 ช่องอากาศ (a) leakage fields (b) and zig-zag

จากภาพประกอบ 2-8(a) , (b) ช่องอากาศและฟลักซ์ซิกแซก ความกว้างของช่องอากาศที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ จะเป็นการตัดสินใจสำหรับการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยแต่ละปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ ความเยื้องศูนย์กลาง (eccentricities) ความผิดปกติ (irregularities) ในช่องอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดเสียงรบกวนขึ้นที่มอเตอร์ (motor noise) การสูญเสียที่เพิ่มขึ้น และการดึงด้านข้างทางแม่เหล็กของโรเตอร์ (magnetic side-pull) ในการกำหนดตำแหน่งของโรเตอร์สำหรับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ จะใช้ร่องลื่นที่สามารถปรับได้เพื่อที่จะหาตำแหน่งของโรเตอร์ที่เหมาะสมหลังจากที่โรเตอร์ถูกกำหนดตำแหน่งอย่างเหมาะสมแล้วจึงยึดตายให้อยู่กับที่

2.1.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3-เฟส

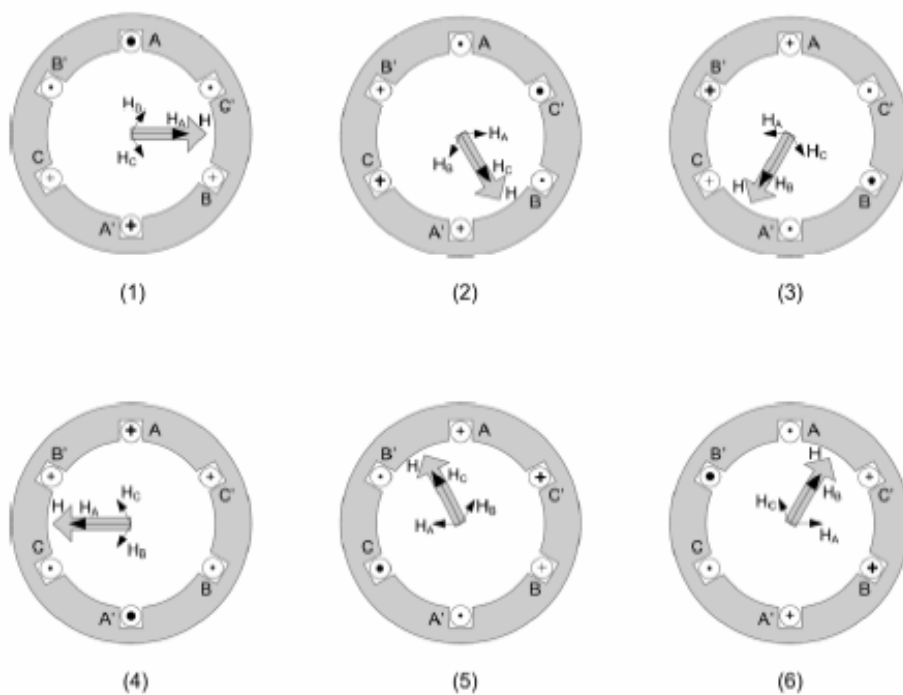
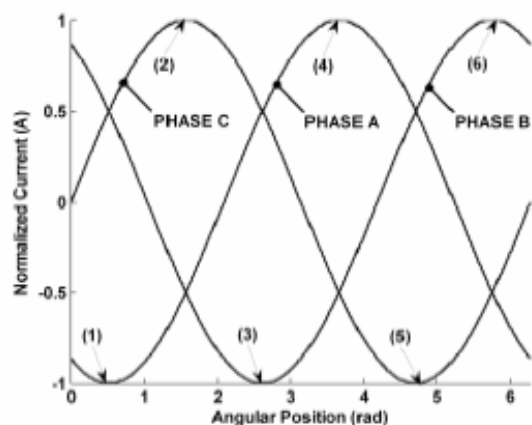
หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้น เกิดขึ้นจากการหมุนของสนามแม่เหล็ก (synchronous speed) ที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์ 3 ชุด วางทำมุมกัน 120 องศาทางไฟฟ้า โดยที่ขดลวดทั้ง 3 ชุดนั้นได้รับไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส ดังภาพประกอบ 2-9



ภาพประกอบ 2-9 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์ 3 เฟส

จากภาพประกอบ 2-9 เมื่อกระแส I ไหลผ่านขดลวด จะผลิตสนามแม่เหล็ก H ขึ้น โดยเกิดเป็นขั้วเหนือ-ใต้ที่ขดลวดนี้ สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแส I นี้ และจะกระจายไปในช่องอากาศมีลักษณะเป็น ไซนูซอยด์ลและจะสลับขั้วที่มุม 180 องศาทางไฟฟ้า ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดชุด A ชุด B และชุด C ก็คือ H_A , H_B และ H_C ซึ่งเกิดจากกระแส I_A , I_B และ I_C โดยแต่ละเฟส จะทำมุมกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลผ่านโรเตอร์และสเตเตอร์ ผลของสนามแม่เหล็กที่เวลาใดๆ คือผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เฟส H_A , H_B , และ H_C จะเคลื่อนที่แบบไซนูซอยด์ลไปตามทิศทางดังภาพประกอบ 2-10 ที่เวลา $T=1$ ของกระแสทั้ง 3 เฟส ผลของสนามแม่เหล็ก H_A มีค่าสูงสุดทางด้านลบ เนื่องด้วยกระแสในเฟส A มีค่าสูงสุด และสนามแม่เหล็ก H_B , และ H_C มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ดังนั้นผลรวมของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งนี้จึงมีทิศทางไปตามเฟส A (H_A) ทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาการกระทำที่ตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นซ้ำๆ แบบเดิมตั้งแต่ตำแหน่ง $T=2$ ถึง เวลา $T=6$ สนามแม่เหล็กหมุนจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เกิดขึ้นโดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟสและจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์ขึ้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์ตัดผ่านแท่งตัวนำโรเตอร์ และจะเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ที่มีขั้วตรงกันข้ามกับสเตเตอร์ ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน ดังนั้นทิศทางการหมุนของโรเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์ แต่ตัวโรเตอร์จะหมุนช้ากว่าเล็กน้อย

ความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์ กับความเร็วโรเตอร์นี้ เรียกว่า “ความเร็วสลิป” (slip-speed) และผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ต่อขั้วและกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์เป็นผลทำให้เกิดแรงบิด (torque) ขึ้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบ 2-10 ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 โพล

จากภาพประกอบ 2-10 เครื่องหมายจุดหนาและเครื่องหมายวงหนาแสดงถึงกระแสเฟสระหว่างที่มีค่าสูงสุด เครื่องหมายจุดปกติและเครื่องหมายวงปกติแสดงถึงกระแสเฟสที่มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด

2.1.3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.3.1 แรงเคลื่อนและกระแส

มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับไฟ 3 เฟส จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับที่มีเฟสห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า(phase-shifted) หรือ $\frac{2\pi}{3}$ electric radians กระแสทั้ง 3 เฟส สามารถหาค่าได้ตามสมการ (2-1)

$$i_a = I_m \cos(\omega t - \phi)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t - \phi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2-1)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t - \phi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

เมื่อ	i_a	คือกระแสของเฟส A	(A)
	i_b	คือกระแสของเฟส B	(A)
	i_c	คือกระแสของเฟส C	(A)
	I_m	ค่ากระแสสูงสุดของแต่ละเฟส	(A)
	ω	คือความเร็วเชิงมุม	(rad/sec)
	ϕ	คือมุมล่าช้าของเพาเวอร์แฟกเตอร์	(rad)
	t	คือเวลา	(sec)

เนื่องจากกระแสแต่ละเฟสทำมุมห่างกันเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้าที่มีลักษณะสมมาตรกัน ผลรวมของกระแสทั้งสามเฟสมีค่าเป็นศูนย์ ค่านี้สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2-2)

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2-2)$$

ในส่วน of แรงเคลื่อนแต่ละเฟสก็มีมุมที่ห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าเหมือนกัน หรือมีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{3}$ electrical radians เมื่อใช้แรงเคลื่อนเฟส A เป็นตัวเปรียบเทียบ แรงเคลื่อนทั้งสามเฟสอธิบายได้จากสมการ (2-3)

$$\begin{aligned}
 v_a &= V_m \cos(\omega t) \\
 v_b &= V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 v_c &= V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = V_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

เมื่อ	v_a	คือแรงเคลื่อนเฟส A	(v)
	v_b	คือแรงเคลื่อนเฟส B	(v)
	v_c	คือแรงเคลื่อนเฟส C	(v)
	V_m	คือค่าแรงเคลื่อนสูงสุดของแต่ละเฟส	(v)

แรงเคลื่อนทั้งสามเฟสสามารถเขียนให้อยู่ในรูป polar form ได้ดังสมการที่ (2-4)

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_a &= V_m \angle 0^\circ \\
 \bar{V}_b &= V_m \angle -120^\circ = V_m \angle -\frac{2\pi}{3} \\
 \bar{V}_c &= V_m \angle -240^\circ = V_m \angle -\frac{4\pi}{3}
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

อนึ่ง เนื่องจากแรงเคลื่อนแต่ละเฟสมีมุมห่างกัน 120° องศาทางไฟฟ้าและสมมาตรกันทั้งสามเฟส ผลรวมของแรงเคลื่อนทั้งสามเฟสในลักษณะนี้จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (2-5)

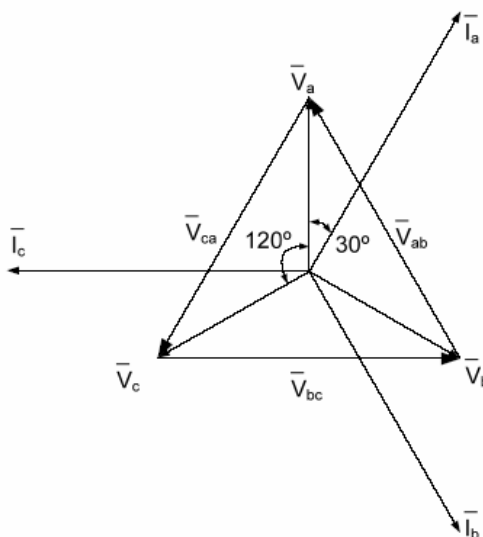
$$v_a + v_b + v_c = 0 \tag{2-5}$$

ระบบแรงเคลื่อนสามเฟสอธิบายให้อยู่ในแบบของแรงเคลื่อนเฟส (phase voltage ; v_p) หรือแรงเคลื่อนไลน์ (line voltage ; v_l) ความสัมพันธ์ระหว่าง v_p และ v_l อธิบายได้จากสมการ (2-6)

$$v_l = \sqrt{3} v_p \tag{2-6}$$

เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าระบบสามเฟสจ่ายเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสเฟสจะล่าช้า (lagging) กับแรงเคลื่อนเฟส มุมระหว่างแรงเคลื่อนและกระแสที่ห่างกันนี้เรียกว่าตัวประกอบกำลัง (power factor ; ϕ) ϕ ปกติขึ้นใกล้ซัดกันมีค่า 30° สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.5 hp และ

2 hp ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงให้เห็นจากแผนภาพเฟสเซอร์ (phasor diagram) ตามภาพประกอบ 2-11



ภาพประกอบ 2-11 เฟสเซอร์ของกระแสและแรงเคลื่อนสแตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในกรณีของ \bar{V}_{ab} , \bar{V}_{bc} , \bar{V}_{ca} หาค่าได้โดยใช้สมการ (2-7)

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b \\ \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b - \bar{V}_c \\ \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c - \bar{V}_a\end{aligned}\quad (2-7)$$

ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนเฟส V_m เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าใช้งาน (effective voltage) หรือแรงเคลื่อน อาร์เอ็มเอส V_{rms} โดยใช้ตัวประกอบคูณกับ $\sqrt{2}$ ดังสมการ (2-8)

$$\begin{aligned}v_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [V_m \cos(\omega t)]^2 d(\omega t)} \\ v_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} V_m^2 \left[\frac{1}{2} (\omega t - \sin(\omega t) \cos(\omega t)) \right]_0^{\pi}} \\ v_{rms} &= \frac{V_m}{\sqrt{2}}\end{aligned}\quad (2-8)$$

2.1.3.2 อัตราเร็วซิงโครนัส อัตราเร็วซิงโครนัส อัตราเร็วสลลิป

จากภาพประกอบ 2-9 แสดงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยแต่ละเฟสของมอเตอร์ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด คือ AA', BB' และ CC' ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์เป็นแบบพันขดลวด (wound rotor) ก็จะประกอบไปด้วยขดลวด 3 ชุดเช่นเดียวกัน คือ aa', bb' และ cc' แต่ถ้าหากกรณีโรเตอร์เป็นแบบแท่งตัวนำหรือกรงกระรอก (squirrel cage rotor) จะมีการลัดวงจรที่ปลายของตัวนำด้วยวงแหวน เมื่อสเตเตอร์ถูกจ่ายด้วยไฟสามเฟสซึ่งมีความถี่เชิงมุม ω เข้าไปที่สเตเตอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field) ขึ้นในช่องอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ด้วยอัตราเร็วซิงโครนัส ω_{ms} (synchronous speed) โดยหาค่าได้จากสมการ (2-9), (2-10)

$$\omega_{ms} = \frac{2}{p} \omega = \frac{4\pi f_s}{p} \quad (\text{rad/sec}) \quad (2-9)$$

$$\text{หรือ} \quad n_{syn} = \frac{120 f_s}{p} \quad (\text{rpm}) \quad (2-10)$$

โดยที่

$$p = \text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole)}$$

$$n_{syn} = \text{อัตราเร็วซิงโครนัส (rpm)}$$

$$f_s = \text{ความถี่ (Hz)}$$

ถ้าอัตราเร็วของโรเตอร์เป็น n_{asyn} ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนกับอัตราเร็วโรเตอร์ก็คืออัตราเร็วสลลิป (slip-speed) จะมีค่าดังสมการ (2-11)

$$n_s = n_{syn} - n_{asyn} \quad (2-11)$$

เมื่อ n_s คืออัตราเร็วสลลิปมีหน่วยเป็น รอบ/นาที n_{asyn} คืออัตราเร็วซิงโครนัสมีหน่วยเป็น รอบ/นาทีเช่นเดียวกัน (slip หมายถึงการไถล, การลื่นไหล) และตัวแปร s ก็คือสลลิป โดยที่ สลิปหาค่าได้จากสมการ (2-12)

$$s = \frac{n_{syn} - n_{asyn}}{n_{syn}} \quad (2-12)$$

เมื่ออัตราเร็วเชิงโคจรก็คืออัตราเร็วของโรเตอร์นั่นเอง จากสมการ (2-12) จะได้สมการที่ใช้สำหรับหาค่าอัตราเร็วโรเตอร์ได้ตามสมการที่ (2-13)

$$n_{\text{asyn}} = n_{\text{syn}}(1-s) \quad (2-13)$$

ค่า n_s นี้จะขึ้นอยู่กับโหลด กล่าวคือ เมื่อโหลดมากขึ้นก็จะมีผลทำให้โรเตอร์หมุนช้าลง ส่งผลให้ n_s มีค่ามากขึ้น ทำให้โรเตอร์ถูกสนามแม่เหล็กลัพท์หมุนตัดด้วยอัตราเร็วมากขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้น ผลก็คือกระแสในตัวโรเตอร์มากขึ้นและด้วยหลักการเดียวกับหม้อแปลงเมื่อกระแสด้านทุติยภูมิมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสด้านปฐมภูมิมีค่ามากขึ้นด้วย เราจึงสามารถกล่าวได้ว่า ภาระทางกลจะถูกส่งผ่านภาระทางไฟฟ้าในรูปของค่าสลลิปนั่นเอง

เนื่องจากความแตกต่างของอัตราเร็วระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วยสลลิป ดังสมการ (2-14)

$$f_r = \frac{n_s}{n_{\text{syn}}} \cdot f_s = sf_s \quad (\text{hz}) \quad (2-14)$$

โดยที่ f_r คือความถี่ของโรเตอร์ (hz)

สำหรับที่อัตราความเร็ว $n_{\text{asyn}} < n_{\text{syn}}$ แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์ร่วมกันทางเวกเตอร์และสามารถหาค่าได้จากสมการ(2-15)

$$T = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{2} \right)^2 \phi_{ma} F_{mr} \sin \delta_r \quad (2-15)$$

โดยที่ ϕ_{ma} = เส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศต่อขั้วแม่เหล็ก (weber)

F_{mr} = แรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดบนโรเตอร์ (peak rotor mmf, Ampere-turn)

δ_r = มุมระหว่างโรเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ(airgap mmf's)

2.1.3.3 การคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็ก

การคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux - linkage) ใช้อธิบายในการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงจำนวนของเส้นทางแม่เหล็กที่คล้อยผ่านวงจรไฟฟ้าของขดลวดเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยผ่าน (magnetic flux ; ψ) หาได้จากสมการ (2-16)

$$\psi = \int Nd\phi \quad (2-16)$$

ในที่นี้ N คือจำนวนรอบของขดลวด และ ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (wb) ดังนั้นการคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็กจึงมีหน่วยที่ใช้เป็น เวเบอร์-รอบ (wb-turns) จากกฎของฟาราเดย์ กล่าวว่า แรงที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic force ; e.m.f) หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า e ที่เหนี่ยวนำขึ้นในวงจรไฟฟ้า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยเกี่ยวในวงจรไฟฟ้านั้นเทียบกับเวลา ดังสมการ (2-17)

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2-17)$$

ในวงจรไฟฟ้าที่เป็นทำนองเดียวกัน การคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นจำนวนที่เป็นสัดส่วนกับกระแส i ดังนั้นสามารถหาเส้นแรงแม่เหล็กได้ตามสมการ (2-18)

$$\psi = Li \quad (2-18)$$

โดยที่ L เป็นค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (self-inductance) มีหน่วยเป็นเฮนรี (H) ถ้า L เป็นค่าที่สัมพันธ์กับ i ดังนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้หาได้จากสมการ (2-19)

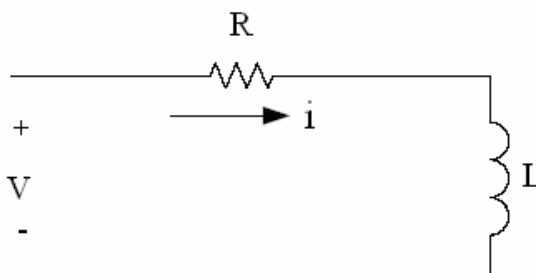
$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L\frac{di}{dt} \quad (2-19)$$

นั่นคือ

$$\frac{d\psi}{dt} = L\frac{di}{dt} \quad (2-20)$$

เมื่อพิจารณาวงจรที่มีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ดังภาพประกอบ 2-12 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-21)

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2-21)$$



ภาพประกอบ 2-12 วงจรที่มีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม

จากภาพประกอบ 2-12 จะได้สมการพีชคณิตในการแสดงค่าการคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็กใหม่ ตามสมการ (2-22)

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (2-22)$$

นั่นคือ

$$\frac{d\psi}{dt} = v - Ri \quad (2-23)$$

หรือ

$$d\psi = (v - Ri)dt \quad (2-24)$$

ดังนั้น

$$\psi = \int (v - Ri)dt \quad (2-25)$$

ถ้าวงจรที่มีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน โดยจ่ายแรงเคลื่อนเข้าสู่วงจรทั้งสองเฟส ดังภาพประกอบ 2-13 แรงเคลื่อนและการคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็กของเฟส a และเฟส b สามารถหาได้จาก

$$v_{ab} = v_a - v_b$$

นั่นคือ

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b)$$

ดังนั้น

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + \frac{d}{dt}[L(i_a - i_b)]$$

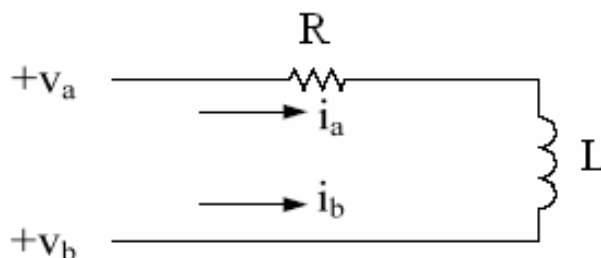
หรือ

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + \frac{d\psi_{ab}}{dt}$$

จะได้

$$\frac{d}{dt}[L(i_a - i_b)] = \frac{d\psi_{ab}}{dt} = v_{ab} - R(i_a - i_b)$$

$$\psi_{ab} = \int v_{ab} - R(i_a - i_b) dt \quad (2-26)$$



ภาพประกอบ 2-13 วงจรที่มีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม โดยจ่ายแรงเคลื่อนสองเฟส

ทำนองเดียวกันกระบวนการดังภาพประกอบ 2-13 นี้ ได้ค่าการคล้องเกี่ยวเส้นแรงแม่เหล็กของเฟส b กับเฟส c คือ ψ_{bc} ส่วนของเฟส c กับเฟส a คือ ψ_{ca} ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ตามลำดับดังนี้

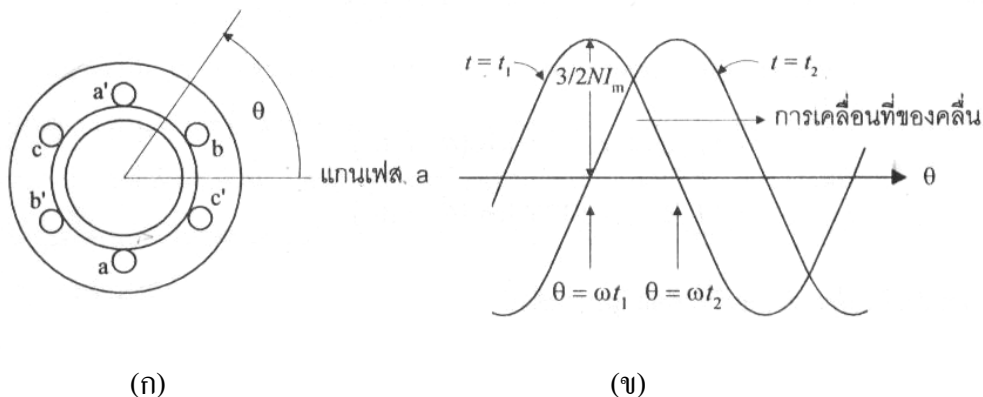
$$\psi_{bc} = \int v_{bc} - R(i_a - i_c) dt \quad (2-27)$$

$$\psi_{ca} = \int v_{ca} - R(i_c - i_a) dt \quad (2-28)$$

2.1.3.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก [ผศ.ปริพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์, 2544]

แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force ; mmf) เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ จะเกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กกระจายเป็นแบบไซนูซอยด์ โดยมีแกนอยู่ตรงกึ่งกลางของขดลวดเฟสนั้น ถ้ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเป็นกระแสสลับ จะเกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กแบบไซนูซอยด์ ขนาดและทิศทางของคลื่นขึ้นอยู่กับกระแสชั่วขณะที่ไหลผ่าน

ขดลวดในเวลานั้น ขดลวดในแต่ละเฟสจะสร้างรูปคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่กระจายขึ้นเป็นแบบไซน์ซอซยต์คล้ายๆกัน แต่จะห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็กได้จากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสามเฟส ในเครื่องจักรกลชนิด p ขั้ว เมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงครบหนึ่งรอบแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนไป $2/p$ รอบ



ภาพประกอบ 2-14 การเคลื่อนที่ของผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

การพิจารณาผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในช่องอากาศ ถ้ากำหนดมุมเริ่มต้นเท่ากับ θ เทียบกับแกนแม่เหล็กในเฟส a ดังภาพประกอบ 2-14 (ก) ที่เวลาขณะใดขณะหนึ่งนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มุมนี้จะมีค่าตามสมการ (2-29)

$$F(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \tag{2-29}$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กจะมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในเฟสนั้น ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กในแนวนุม θ จะมีค่าเท่ากับ

$$F_a(\theta) = Ni_a \cos \theta \tag{2-30}$$

โดยที่ N คือจำนวนรอบยังผลของเฟส a

i_a คือกระแสในเฟส a

เนื่องจากแกนของแต่ละเฟสถูกเลื่อนไปเป็นมุม 120° ทางไฟฟ้า ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กในเฟส b และเฟส c จะมีค่าดังนี้

$$F_b(\theta) = Ni_b \cos(\theta - 120^\circ) \tag{2-31}$$

$$F_c(\theta) = Ni_c \cos(\theta + 120^\circ) \quad (2-32)$$

ดังนั้นผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็กในแนวมุม θ จะมีค่าเท่ากับ

$$F(\theta) = Ni_a \cos \theta + Ni_b \cos(\theta - 120^\circ) + Ni_c \cos(\theta + 120^\circ) \quad (2-33)$$

กระแส i_a , i_b และ i_c เป็นฟังก์ชันของเวลาตามนิยามในสมการ (2-1) , (2-2) และ(2-3) ดังนั้นค่าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของมุม θ และเวลา t ดังนี้

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= NI_m \cos \omega t \cos \theta \\ &+ NI_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\ &+ NI_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \quad (2-34) \end{aligned}$$

จากสมการ (2-34) แก้สมการโดยใช้ความสัมพันธ์ทางด้านตรีโกณมิติได้จาก

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A - B) + \frac{1}{2} \cos(A + B) \quad (2-35)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta) \\ &+ \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) \\ &+ \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta + 240^\circ) \quad (2-36) \end{aligned}$$

จากสมการ (2-36) จะได้สมการของแรงเคลื่อนแม่เหล็กผลลัพธ์ดังนี้

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) \quad (2-37)$$

สมการ (2-37) เป็นผลลัพธ์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศ ซึ่งจะหมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ($\omega = 2\pi f$) และแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะกระจายเป็นแบบไซนูซoidal ตลอดรอบช่องอากาศทุกๆเวลา ดังแสดงในภาพประกอบ 2-14 (ข) ที่เวลา t_1 ยอดคลื่นสูงสุดเกิดขึ้นตาม

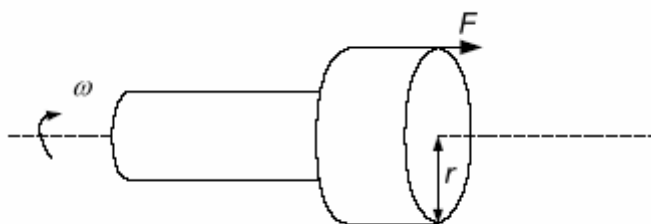
แนวของมุม $\theta = \omega t_1$ ที่เวลา t_2 ขอดเคลื่อนสูงสุดเกิดขึ้นตามแนวของมุม $\theta = \omega t_2$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เคลื่อนเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่ากับ $\omega(t_2 - t_1)$

2.1.3.5 แรงบิด

แรงบิด (Torque) คือแรง F ที่กระทำให้วงล้อยที่มีรัศมี r หมุนไปรอบแกนได้ครบรอบ ดังนั้นแรงบิด T หาได้จากสมการ (2-38)

$$T = F r \quad (2-38)$$

เมื่อ F คือแรง มีหน่วยวัดเป็นนิวตัน (Newtons ; N) ที่จ่ายไปยังวงล้อ และ r เป็นรัศมีของวงล้อ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-15



ภาพประกอบ 2-15 แรงบิดที่เกิดจากการหมุนของวงล้อ

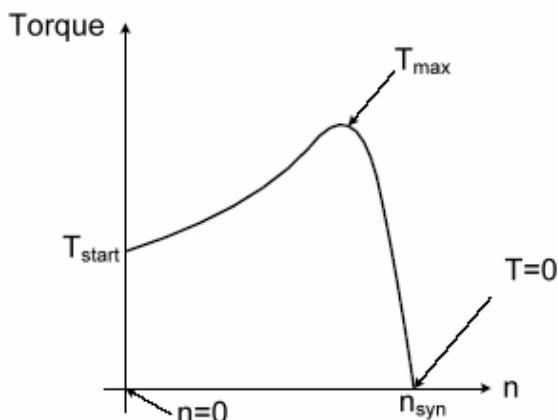
แรงบิด (torque) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก mmf บริเวณช่องอากาศของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งแรงบิดจะเกิดขึ้นบนแกนมอเตอร์เพียงอย่างเดียว การหมุนของโรเตอร์จะมีความเร็วช้ากว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน ถ้าความเร็วสลิปไม่มีค่าเป็นศูนย์ แรงบิด T ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงการคำนวณได้หลายวิธี ในที่นี้จะแสดงการคำนวณ แรงบิดที่ช่องอากาศ (air gap torque) มีสมการที่ใช้ดังนี้

$$T = \frac{P}{2\sqrt{3}} [(i_a - i_b)\psi_{ca} - (i_c - i_a)\psi_{ab}] \quad (2-39)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (2-26) ถึง (2-28) แทนในสมการ (2-39) สามารถเขียนสมการใหม่เพื่อหาค่าแรงบิดที่ช่องอากาศได้ดังนี้

$$T = \frac{P}{2\sqrt{3}} \left\{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} - R(i_c - i_a)] dt - (i_c - i_a) \int [v_{ab} - R(i_a - i_b)] dt \right\} \quad (2-40)$$

เมื่อ p เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก (poles) R เป็นครึ่งหนึ่งของความต้านทานไลน์ถึงไลน์ กรณีมอเตอร์ต่อแบบสตาร์ เทอมที่อยู่ในเครื่องหมายอินทิเกรตครั้งแรกหมายถึงค่าการคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็ก, ψ_{ca} ของสมการ (2-28) และเทอมที่อยู่ในเครื่องหมายอินทิเกรตลำดับที่สองหมายถึงค่าการคล้อยเกี่ยวของเส้นแรงแม่เหล็ก, ψ_{ab} ของสมการ (2-26) กราฟที่แสดงคุณสมบัติของแรงบิด – ความเร็ว (Torque – Speed characteristic curve) แสดงดังภาพประกอบ 2-16



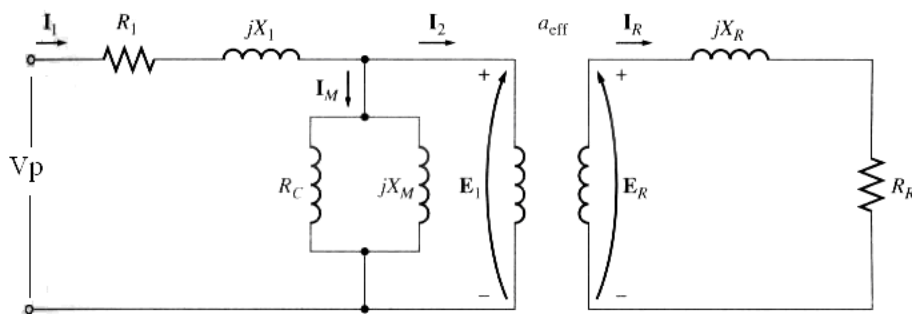
ภาพประกอบ 2-16 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงบิด- ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.3.6 แบบจำลองวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในหัวข้อนี้จะจำลองวงจรสมมูลต่อเฟสในสถานะอยู่ตัวเพื่อใช้ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ถ้ามีกระแสไหลทั้งในชุดขดลวดสเตเตอร์และชุดขดลวดโรเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศของทั้งสองชุดขดลวด และเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองหมุนไปด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสเหมือนกัน ดังนั้นจะเกิดเป็นผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กหมุน ที่หมุนไปด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสเช่นกัน ผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในชุด

ขดลวดสเตเตอร์ด้วยความถี่ f_s และขดลวดโรเตอร์ด้วยความถี่ f_r วงจรสมมูลที่ได้จะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลง ดังภาพประกอบ 2-17



ภาพประกอบ 2-17 วงจรสมมูลในอุดมคติของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส

[ที่มา : ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS , STEPHEN J. CHAPMAN , PP 389:]

ขดลวดสเตเตอร์มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- V_p คือแรงเคลื่อนที่ขั้วต่อเฟส
- R_1 คือความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
- X_1 คือความเหนี่ยวนำเนื่องจากฟลักซ์รั่วในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
- E_1 คือแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส
- X_m คือความเหนี่ยวนำเนื่องจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ต่อเฟส
- R_c คือความต้านทานการสูญเสียกำลังในแกนเหล็กของสเตเตอร์ต่อเฟส

รูปแบบวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเหมือนกับวงจรสมมูลด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง แต่ค่าพารามิเตอร์จะต่างกันเพราะกระแสกระตุ้น I_m ในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่ามากกว่า เนื่องจากสนามแม่เหล็กเดินผ่านช่องอากาศ ค่ากระแสกระตุ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าประมาณ 30 – 50% ของกระแสฟลักซ์ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์ แต่ในหม้อแปลงค่ากระแสกระตุ้นจะมีค่าประมาณ 1 – 5% เท่านั้น นอกจากนี้รีแอกแตนซ์เนื่องจากฟลักซ์รั่ว X_1 ยังมีขนาดมากกว่า สาเหตุเนื่องจากสนามแม่เหล็กเดินผ่านช่องอากาศและขดลวดกระจายอยู่ในร่องขดลวดไม่เป็นกลุ่มขดลวดเหมือนในหม้อแปลง

วงจรโรเตอร์มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

E_R คือแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในโรเตอร์ขณะหยุดนิ่งต่อเฟส
(ที่ความถี่สเตเตอร์เท่ากับ f_s)

R_R คือความต้านทานในโรเตอร์ต่อเฟส

X_R คือความเหนี่ยวนำเนื่องจากฟลักซ์รั่วต่อเฟส

จากภาพประกอบ 2-17 เป็นวงจรสมมูลที่กระแสโรเตอร์มีความถี่เท่ากับ f_r ดังนั้นกระแสที่ไหลในโรเตอร์มีค่าดังนี้

$$I_R = \frac{sE_R}{R_R + jsX_R} \quad (2-41)$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โรเตอร์ เป็นกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง มีค่าดังนี้

$$P_R = I_R^2 R_R \quad (2-42)$$

จากสมการ (2-41) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_R = \frac{E_R}{\left(\frac{R_R}{s}\right) + jX_R} \quad (2-43)$$

แม้ว่าสมการ (2-41) และสมการ (2-43) มีความแตกต่างของนิพจน์ในสมการ แต่ขนาดและมุมของกระแสยังเหมือนเดิม กระแส I_R ในสมการ (2-41) เป็นกระแสที่ความถี่สลิป f_r แต่กระแส I_R ในสมการ (2-43) เป็นกระแสที่ความถี่ของแหล่งจ่าย f_s ในสมการ (2-41) รีแอกแตนซ์เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว sX_R จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วโดยที่ R_R มีค่าคงที่ ส่วนในสมการ (2-43) ความต้านทาน $\frac{R_R}{s}$ เปลี่ยนแปลงตามความเร็ว ส่วนรีแอกแตนซ์ X_R มีค่าคงที่ กำลังไฟฟ้าต่อเฟสที่จ่ายให้กับวงจรโรเตอร์มีค่าดังนี้

$$P = I_R^2 \frac{R_R}{s} = \frac{P_R}{s} \quad (2-44)$$

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานที่ค่าสลิปต่ำ อยู่ระหว่าง 0.01 – 0.05 เมื่อพิจารณา กำลังไฟฟ้าจะเห็นว่ามีความสูง เนื่องจากวงจรสมมูลนี้แสดงอยู่บนพื้นฐานของความถี่สเตเตอร์ ดังนั้น วงจรสมมูลของโรเตอร์นี้เป็นวงจรที่มองจากสเตเตอร์ จากสมการที่ (2-44) เป็นกำลังที่ข้ามผ่านช่อง อากาศซึ่งเป็นกำลังที่ใช้สร้างกำลังกลรวมถึงกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของโรเตอร์ด้วย ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการ (2-44) ได้ใหม่ดังนี้

$$P = P_{ag} = I_R^2 \left[R_R + \frac{R_R}{s} (1-s) \right] \quad (2-45)$$

$$= I_R^2 \frac{R_R}{s} \quad (2-45a)$$

ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วคือ $\frac{R_R(1-s)}{s}$ จะเป็นส่วนที่แสดงแทนกำลังกล ที่มอเตอร์เหนี่ยวนำสร้างขึ้นมา ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{mech} &= I_R^2 \frac{R_R}{s} (1-s) \\ &= P_{ag} (1-s) \end{aligned} \quad (2-46)$$

$$= p_R \frac{(1-s)}{s} \quad (2-47)$$

และ

$$P_R = I_R^2 R_R = s P_{ag} \quad (2-48a)$$

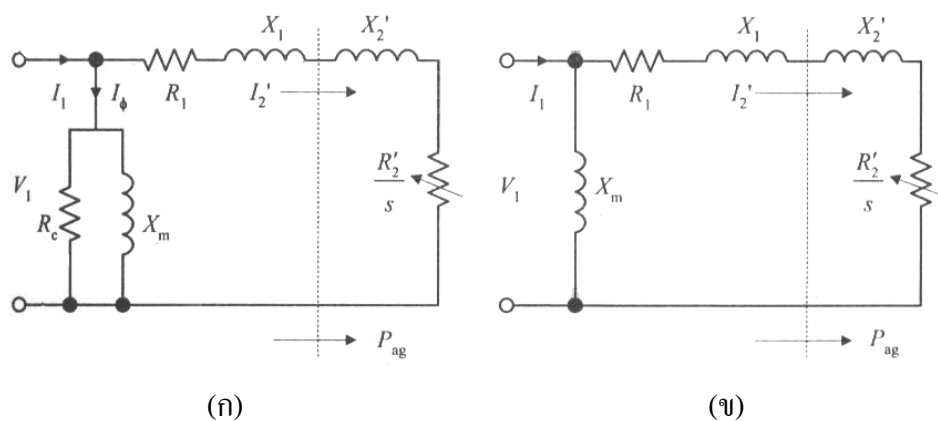
ดังนั้น

$$P_{ag} : P_R : P_{mech} = 1 : s : (1-s) \quad (2-48b)$$

จากสมการ (2-48b) แสดงให้เห็นว่ากำลังอินพุตทั้งหมดที่จ่ายให้กับโรเตอร์คือกำลังที่ข้าม ผ่านช่องอากาศ (air gap) ; โดย p_{ag} ส่วนหนึ่งจะจ่ายให้กับกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของ ขดลวดทองแดงในโรเตอร์ด้วยสัดส่วน s และอีกส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นกำลังกลด้วยสัดส่วน $(1-s)$ ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต้องทำงานที่ค่าสลิปน้อยๆ เพื่อประสิทธิภาพจะได้สูง

กำลังไฟฟ้าที่ผ่านช่องอากาศจะเปลี่ยนเป็นกำลังกลได้มากกว่า กำลังกลที่ได้ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเพื่อเอาชนะแรงลมต้านและแรงเสียดทาน กำลังสุดท้ายที่ได้จึงเป็นกำลังขับที่เพล

วงจรสมมูลตามภาพประกอบ 2-17 ค่า E_1 และ E_2 อาจมีค่าแตกต่างกัน ถ้าจำนวนรอบของขดลวดในสเตเตอร์กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์ไม่เท่ากันดังนั้นจึงใช้สัดส่วนจำนวนรอบ $\left(a = \frac{N_s}{N_R} \right)$ เข้ามาพิจารณาด้วย ภาพวงจรสมมูลนี้จะเหมือนกับวงจรสมมูลห่อแปลงชนิดสองขดลวดทุกประการ แต่วงจรสมมูลแบบนี้ไม่เหมาะที่จะใช้ทำนายสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพราะยุ่งยากเกินไป จึงมีการตัดแปลงรูปแบบให้ง่ายขึ้น ดังนี้



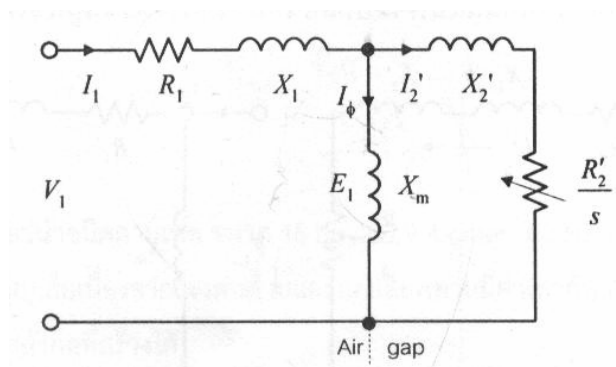
ภาพประกอบ 2-18 วงจรสมมูลโดยประมาณ

จากภาพประกอบ 2-18 เป็นวงจรสมมูลโดยประมาณ ถ้าแรงเคลื่อนตกคร่อม R_1 และ X_1 มีค่าน้อย และแรงเคลื่อนที่ขั้ว V_1 ไม่แตกต่างจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_1 มากนัก เราสามารถที่จะเลื่อนวงจรขนาน (R_c และ X_m) ให้ไปอยู่ตรงขั้วของวงจรสมมูลได้ดังภาพประกอบ 2-18(ก) วงจรสมมูลโดยประมาณที่ได้ทำให้การคำนวณง่ายขึ้น กระแสกระตุ้น I_ϕ กับกระแสโหลด I_2' สามารถหาได้โดยตรงจากแรงเคลื่อนที่ขั้ว V_1 หากด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่เกี่ยวข้อง

ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำค่ออยู่กับแหล่งจ่ายที่มีแรงเคลื่อนและความถี่คงที่ กำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ด้วย ที่ภาวะไร้อโหลด มอเตอร์จะมีความเร็วรอบใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัสมาก ความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์ f_r จึงมีค่าน้อยมาก ทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กของโรเตอร์มีค่าน้อยมากเช่นกัน ที่ความเร็วรอบต่ำกว่านี้ f_r จะมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียในแกนเหล็กก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่าเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง กำลังสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมนี้จะตรงข้ามกับกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงลมต้านและแรงเสียดทาน เพราะที่ภาวะไร้อโหลดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงลมต้านและแรงเสียดทานจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความเร็วรอบ

ลดลง สรุปได้ว่าถ้ามอเตอร์ทำงานโดยได้รับแรงเคลื่อนจากแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดแรงเคลื่อนและความถี่คงที่แล้ว แม้ว่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนแปลงไปแต่ผลรวมของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กกับกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงลมต้านและแรงเสียดทานยังคงมีค่าคงเดิม และเรียกกำลังสูญเสียนี้ว่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการหมุน (no-load rotational losses) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ถ้ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กรวมไว้กับกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงลมต้านและแรงเสียดทานแล้ว R_c ในวงจรสมมูลสามารถตัดออกไปได้เลย ดังภาพประกอบ 2-18(ข)

เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ทำให้กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_ϕ มีค่าสูงซึ่งอยู่ในช่วง 30-50% ของกระแสเต็มพิกัด ทำให้รีแอคแตนซ์เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว X_1 มีค่าสูงด้วยเพื่อความเหมาะสม IEEE แนะนำว่า X_m ไม่ควรย้ายออกไปอยู่ที่ขั้วของแรงเคลื่อน ควรนำมาไว้ตำแหน่งเดิม ดังภาพประกอบ 2-19 ความเหมาะสมของวงจรสมมูลนี้คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_1 จะมีขนาดแตกต่างจากแรงเคลื่อนที่ขั้ว V_1 เนื่องจากผลของแรงดันตกคร่อมใน X_1 มีนัยสำคัญ

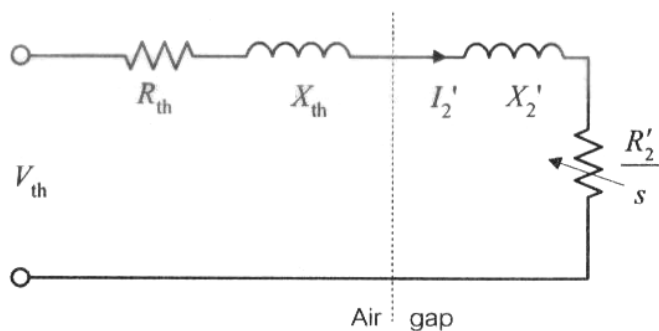


ภาพประกอบ 2-19 วงจรสมมูลตามที่ IEEE แนะนำ

เพื่อให้การคำนวณทำได้สะดวกขึ้น จึงตัดแปลงวงจรให้เป็นวงจรเทวินินโดยแปลง V_1 , R_1 , X_1 และ X_m ให้เป็น V_{th} , R_{th} , และ X_{th} โดยที่

$$V_{th} = \frac{X_m}{[R_1^2 + (X_1 + X_m)^2]^{1/2}} V_1 \quad (2-49)$$

วงจรเทวินิน ดังแสดงตามภาพประกอบ 2-20



ภาพประกอบ 2-20 วงจรสมมูลเทวินิน

โดยทั่วไปแล้ว $R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2$, แรงดันเทวินินจะหาได้ใหม่ดังนี้

$$V_{th} = \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1 \quad (2-50a)$$

$$= K_{th} V_1 \quad (2-50b)$$

อิมพีแดนซ์ของวงจรเทวินินมีค่าเท่ากับ

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

$$= R_{th} + jX_{th}$$

$$\text{ถ้า } R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2 \text{ แล้ว } R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 R_1 \quad (2-51)$$

$$= K_{th}^2 R_1 \quad (2-51a)$$

และเนื่องจาก $X_1 \ll X_m$

$$X_{th} \approx X_1 \quad (2-52)$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์กรงกระรอก ขนาด 0.5 hp , 220/380 Volts , 4 pole 50-Hz ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของการทดลองดังนี้

■ การทดสอบภาวะไร้โหลด (No load test)

ความถี่จากแหล่งจ่าย	50	Hz
แรงดันไลน์	400	V
กระแสไลน์	0.8/0.76/0.84	A
I_1	=	$\frac{0.80 + 0.76 + 0.84}{3}$
	=	0.8 A
กำลังอินพุตที่จ่ายเข้า	100	W

■ การทดสอบภาวะโรเตอร์หยุดหมุน (Blocked rotor test)

ความถี่	50	Hz
แรงดันไลน์	160	V
กระแสไลน์	1	A
กำลังอินพุตที่จ่ายเข้า	170	W

■ ค่าความต้านทานต่อเฟสของสเตเตอร์

$$\begin{aligned}
 U_1 - U_2 &= 27.79 \quad \Omega \\
 V_1 - V_2 &= 26.97 \quad \Omega \\
 W_1 - W_2 &= 28.25 \quad \Omega \\
 R_1 &= \frac{27.79 + 26.97 + 28.25}{3} \\
 &= 27.67 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

จากข้อมูลการทดสอบมอเตอร์ภาวะไร้โหลด (No-load test) กำลังสูญเสียขณะไร้โหลด (No-load) มีค่าเท่ากับ

$$P_{nl} = 100 \quad \text{W}$$

■ กำลังสูญเสียเนื่องจากการหมุน

$$\begin{aligned}
 P_{Rot} &= P_{nl} - 3(I_1^2 R_1) \\
 &= 100 - 3(0.8)^2 (27.67) \\
 &= 100 - 53.126 \\
 &= 46.87 \quad \text{W}
 \end{aligned}$$

$$V_1 = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \quad \text{V/Phase}$$

$$Z_{nl} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{230.94}{0.8} = 288.675 \quad \Omega$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_1^2} = \frac{100}{3(0.8)^2} = 52.08 \quad \Omega$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} = (288.675^2 - 52.08^2)^{\frac{1}{2}} = 283.94 \quad \Omega$$

$$\text{ดังนั้น } X_1 + X_m = X_{nl} = 283.94 \quad \Omega$$

ในสภาวะ โรเตอร์หยุดหมุน (Blocked rotor)

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3I_1^2} = \frac{170}{3(1)^2} = 56.67 \quad \Omega$$

$$\text{ดังนั้น } R_2' = R_{bl} - R_1 = 56.67 - 27.67 = 29 \quad \Omega$$

■ อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 50 Hz เมื่อ โรเตอร์หยุดหมุน

$$Z_{bl} = \frac{V_1}{\sqrt{3}(I_1)^2} = \frac{170}{\sqrt{3}(1)^2} = 98.15 \quad \Omega$$

■ รีแอกแตนซ์ที่ความถี่ 50 Hz เมื่อโรเตอร์หยุดหมุน

$$\begin{aligned}
 X_{bl} &= \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{bl}^2} \\
 &= \sqrt{98.15^2 - 56.67^2} \\
 &= 80.14 \quad \Omega \\
 X_{bl} &\approx X_1 + X_2' \\
 \text{ดังนั้น} \quad X_1 &= X_2' = \frac{80.14}{2} \\
 &= 40.07 \quad \text{ที่ } 50 \text{ Hz} \\
 X_m &= X_{nl} - X_1 \\
 &= 283.94 - 40.07 \\
 &= 243.87 \quad \Omega \\
 \text{และจาก} \quad R &= R_{bl} - R_1 \\
 &= 56.67 - 27.67 \\
 &= 29 \quad \Omega \\
 R_2' &= \left(\frac{X_2' + X_m}{X_m} \right)^2 R \\
 &= \left(\frac{40.07 + 243.87}{243.87} \right)^2 29 \\
 &= 39.31 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

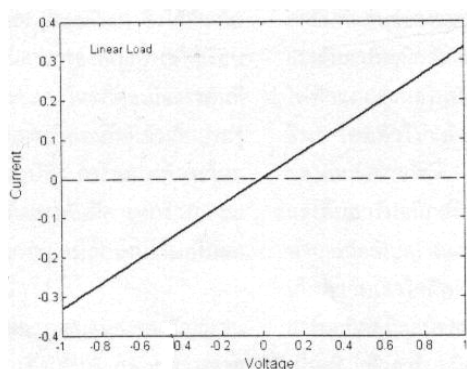
ขนาดมอเตอร์	R_c	R_1	R_2'	X_1	X_2'	X_m
3-φ 0.5 hp.	-	27.67	39.31	40.14	40.07	243.87
3-φ 2.0 hp.	-	3.56	3.10	5.58	5.58	119.32

2.1.3.7 ทฤษฎีฮาร์โมนิกส์

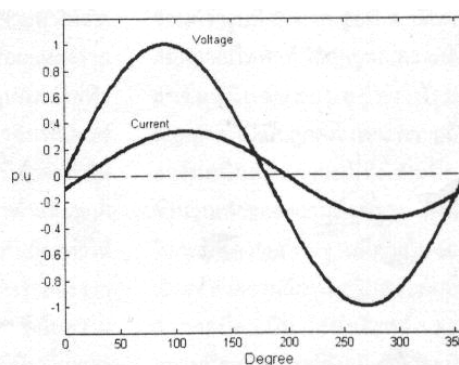
ฮาร์โมนิกส์ (harmonics) ในระบบไฟฟ้า หมายถึงสัญญาณฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้า (current) ที่คิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณลูกคลื่นไซน์ชอยดัล เนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในยุคแรกๆกระแสฮาร์โมนิกส์เกิดจากการอาร์กในหลอดไอปรอทของอุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ปัจจุบันการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในงานอุตสาหกรรมมีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงในเครื่องคอมพิวเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ควบคุมความเร็วได้เป็นต้น ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มสูงขึ้น และมีรูปสัญญาณซับซ้อนมากขึ้น ผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นปัญหาที่กระทบต่อระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น

ในระบบไฟฟ้าที่เป็นอุดมคติสัญญาณไฟฟ้าจะมีรูปร่างเป็นลูกคลื่นไซน์ชอยดัล แต่ในความเป็นจริงจะมีสัญญาณกระแสที่ไม่เป็นลูกคลื่นไซน์ชอยดัล ซึ่งเกิดจากการตอบสนองต่อแรงดันที่จ่ายของภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานที่มีการตอบสนองต่อแรงดันที่จ่ายที่ความถี่ค่าหนึ่งๆแบบเชิงเส้น เช่นตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ จะทำให้รูปสัญญาณของกระแสและแรงดันมีรูปร่างเดียวกัน กล่าวคือหากจ่ายแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ชอยดัลก็จะเกิดกระแสไหลเป็นรูปลูกคลื่นไซน์ชอยดัลเช่นเดียวกัน ภาพประกอบ 2-21 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในกรณีที่มีการตอบสนองของภาระเป็นเชิงเส้นต่อแรงดันที่จ่าย โดยถึงแม้จะมีการเลื่อนของมุมเฟสออกไปแต่ก็ยังทำให้รูปร่างของกระแสเป็นลูกคลื่นไซน์ชอยดัล



(ก)

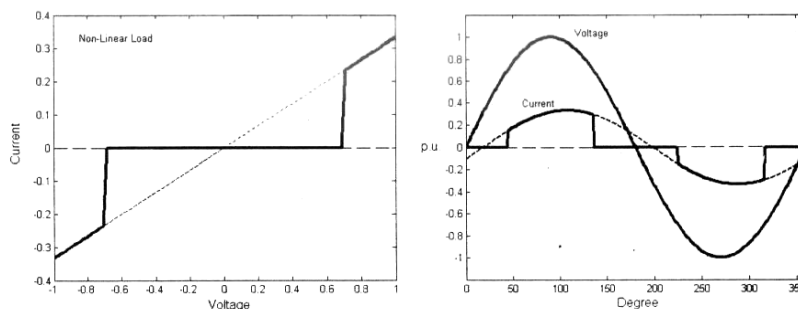


(ข)

ภาพประกอบ 2-21 การตอบสนองต่อภาระที่เป็นเชิงเส้น

[ที่มา : David Chapman, “ Harmonic:Causes and Effects” , Copper Development Association, IEEE, March 2001]

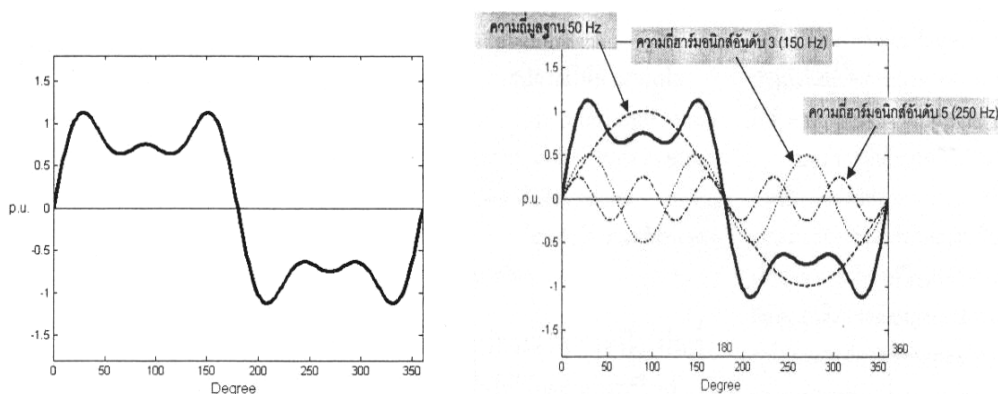
การตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มีผลการตอบสนองต่อแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น กระแสจะไหลก็ต่อเมื่อค่าแรงดันมีค่าสูงเกินค่าหนึ่ง ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองสัญญาณให้เรียบทำให้กระแสที่ไหลก็ต่อเมื่อแรงดันที่จ่ายมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้ ดังภาพประกอบ 2-22



ภาพประกอบ 2-22 การตอบสนองของภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น

[ที่มา : David Chapman, “ Harmonic:Causes and Effects” , Copper Development Association, IEEE, March 2001]

จากภาพประกอบ 2-22 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลได้ก็ต่อเมื่อแรงดันมีค่าสูงกว่า 0.7 pu ทำให้กระแสมีลักษณะไม่เป็นลูกคลื่นไซน์ชอยดัล



(ก)

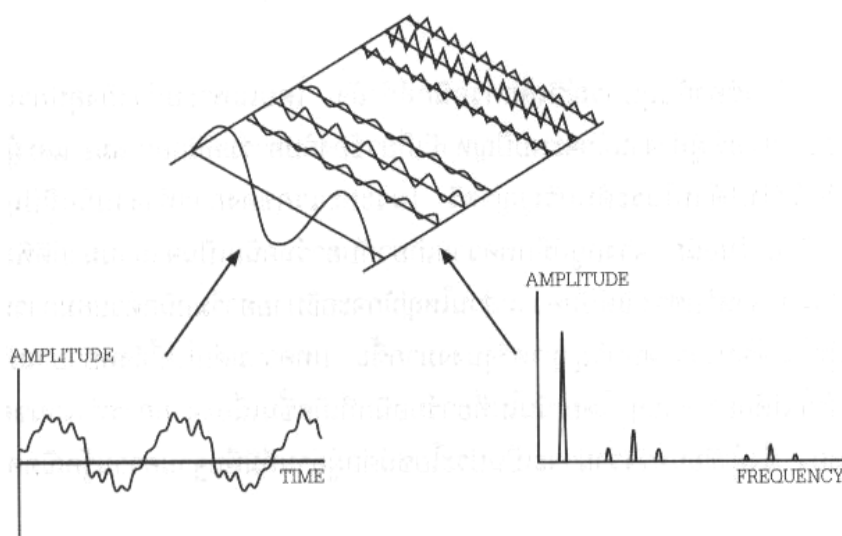
(ข)

ภาพประกอบ 2-23 (ก) สัญญาณที่มีฮาร์โมนิกส์

(ข) สัญญาณแบบไซน์ชอยดัลที่รวมกันเป็นสัญญาณในรูป(ก)

[ที่มา : David Chapman, “ Harmonic:Causes and Effects” , Copper Development Association, IEEE, March 2001]

จากภาพประกอบ 2-23 แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่มีสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกสัปะปนอยู่ทำให้รูปสัญญาณไม่เป็นลูกคลื่นไซน์ชอยดัล ความถี่ฮาร์มอนิกคือความถี่ที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ทั้งนี้กรณีที่มีความถี่มูลฐานมีค่าเป็น 50 เฮิรตซ์ ค่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับ 3 จะมีค่าเป็น 150 เฮิรตซ์ และความถี่ฮาร์มอนิกอันดับ 5 จะมีค่าเป็น 250 เฮิรตซ์ ภาพประกอบ 2-23 (ข) แสดงสัญญาณไฟฟ้าลูกคลื่นไซน์ชอยดัลและฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ 5 ที่รวมกันเป็นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ชอยดัล ภาพประกอบ 2-23 (ก) โดยมีฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ 5 เป็น 50% และ 25% ของความถี่มูลฐานตามลำดับ ในทางปฏิบัติฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะมีหลายอันดับและยังมีการเลื่อนเฟสจากความถี่มูลฐานด้วยซึ่งจะมีความซับซ้อนมากกว่านี้



ภาพประกอบ 2-24 แสดงฮาร์มอนิกใน โดเมนของเวลาและ โดเมนของความถี่

จากภาพประกอบ 2-24 เป็นการแยกแยะรูปคลื่นฮาร์มอนิกออกเป็นรูปคลื่นไซน์ชอยดัลที่มีความถี่ต่างๆ กันตามแกนความถี่ ซึ่งจะเห็นว่าแต่ละรูปคลื่นไซน์ชอยดัลก็จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป ดัชนีที่ใช้ในการบอกปริมาณของสัญญาณฮาร์มอนิกที่รวมอยู่ในสัญญาณไฟฟ้า คือค่าส่วนเบี่ยงเบนของฮาร์มอนิกสัรวม หรือ Total Harmonic Distortion (THD) ซึ่งจะบ่งถึงปริมาณของสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกสัว่าปะปนอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ และสามารถระบุเจาะจงเป็น THD ของสัญญาณฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสซึ่งใช้ตัวย่อเป็น THD_V และ THD_I ได้อีกด้วย

กระแสฮาร์มอนิกส์เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้นต่อแรงดันที่จ่าย ซึ่งมีทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส ตัวอย่างเช่น

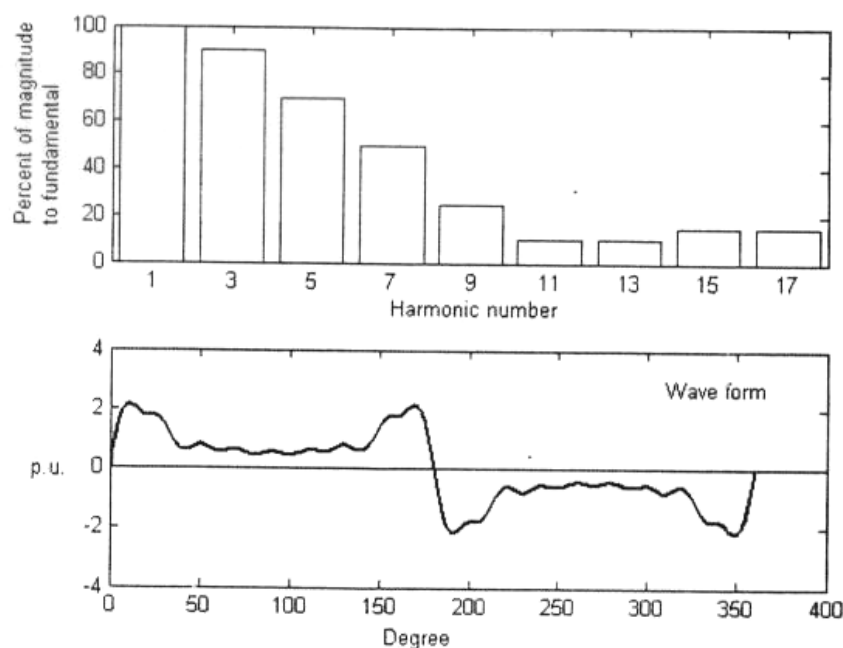
■ อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส

- แบบสวิตซิ่งหรือสวิตโหมด (Switched Mode Power Supply , SMPS) ซึ่งอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์
- บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์
- อุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply , UPS) ขนาดเล็ก

■ อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟส

- อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (Variable Speed Drive) หรืออินเวอร์เตอร์
- อุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (UPS) ขนาดใหญ่

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง ซึ่งแตกต่างจากวิธีเดิมที่ใช้หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลงแล้วทำการแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยการกลับสัญญาณ (Rectify) โดยอุปกรณ์พวกนี้จะดึงกระแสจากระบบไฟฟ้าเป็นช่วง (Pulse Current) ซึ่งเป็นผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 และอันดับอื่นที่สูงมาก ดังภาพประกอบ 2-25



ภาพประกอบ 2-25 สัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง

การนำฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้งาน

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ความถี่หลักมูลคือ 50 เฮิร์ตซ์ โดยปกติแล้วการที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นใดๆ มีอันดับฮาร์มอนิกส์ที่เท่าใดปะปนอยู่บ้าง และฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับนั้นมีปริมาณหรือขนาดมากน้อยแค่ไหน เราสามารถใช้อุณหภูมิฟูริเยร์อธิบายได้ แต่สำหรับงานวิจัยนี้ค่าสเปกตรัมที่แสดงออกมาในแต่ละอันดับของฮาร์มอนิกส์เป็นค่าที่ผ่านการคำนวณ โดยโปรแกรมที่อยู่ในซอฟต์แวร์แล้ว เนื่องจากเราได้นำผลการทดลองที่ได้จากซอฟต์แวร์มาแสดงในหน่วยของอัตราส่วนแรงดันและความถี่ นอกจากนี้ยังพิจารณาลักษณะฮาร์มอนิกส์ในหน่วยของ %THD ได้อีกด้วย โดยความหมายของหน่วย%THD นั้น ได้นิยามไว้ดังนี้

เนื่องจาก THD มีการให้คำนิยามไว้ในมาตรฐาน IEEE Std 519-1992 : IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power System ในมาตรฐาน AS (Australian Standard) 2279.1-1991 : Disturbances in main supply networks , Part 1 : Limitation of harmonic caused by industrial equipment ได้แยกค่า THD ออกเป็นสองส่วนสำหรับแรงดันและกระแสโดยเรียกว่า Total harmonic voltage distortion (Ut) และ Total harmonic current distortion (It) สำหรับมาตรฐาน IEC 555-1 : 1982 : Distortion in supply system caused by household appliances and similar electrical equipment ก็ให้นิยาม THD ไว้แต่เพียงสั้นๆ ว่า Harmonic distortion (HD)

ทั้ง DF , HF , THC หรือ THD ต่างก็ใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล หรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมดทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐานต่างๆจะกำหนดไว้จาก IEEE 519 : 1992 ได้นิยามของ %THD แสดงได้ดังสมการ (2-53)

$$DF_1 = HF_1 = THD_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2-53)$$

โดยที่ I_n คือกระแสอาร์เอ็มเอสที่อันดับฮาร์มอนิกส์ต่างๆ

I_1 คือกระแสสตาร์ตของมอเตอร์

ถ้าเราจะเรียกค่าทั้งสี่นี้รวมๆว่า THD (Total Harmonic Distortion) เราจะทราบว่าค่า THD ตามนิยามมาตรฐาน IEEE และ AS มีโอกาสเกิน 100% ได้ ถ้าในรูปคลื่นของกระแสมีฮาร์มอนิกส์ปนอยู่มาก แต่ถ้า THD ตามนิยามของมาตรฐาน IEC จะไม่มีโอกาสเกิน 100% เนื่องจากกระแส

ฮาร์มอนิกส์จะมีเฉพาะอันดับที่ $4K \pm 1$ โดยที่ $K=1,2,3,4,5,\dots$ และมอเตอร์ที่ใช้ทดลองมีจำนวน 4 ขั้ว ดังนั้นจะได้ว่าฮาร์มอนิกส์จะเกิดขึ้นที่อันดับ 3,5,7,9,...เท่านั้น เราเรียกกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีอันดับเหล่านี้ว่าคุณลักษณะฮาร์มอนิกส์ (Harmonic characteristic) ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองทำให้มอเตอร์เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าในกรณีต่างๆกัน ซึ่งจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ และได้นำสัญญาณฮาร์มอนิกส์กระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์โดยผ่านหม้อแปลงกระแส (current transformer) เพื่อนำสัญญาณอนาล็อกนี้เข้าสู่การ์ดของโปรแกรม LabVIEW เพื่อทำการวิเคราะห์หาคูสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่างๆ จากเครื่องมือวัดเสมือนที่ออกแบบขึ้น ดังนั้นถ้าโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถหาคูสเปกตรัมที่ความถี่ต่างๆได้ก็สามารถที่จะทำให้เรารู้ถึงความแตกต่างระหว่างมอเตอร์ที่มีอาการผิดปกติกับมอเตอร์ที่อยู่ในสภาวะปกติได้